1992—2017 年托木尔峰国家级自然保护区冰川变化

赵景啟，满苏尔·沙比提，麦丽开·艾麦提，尼加提·伊米尔
（新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054）

摘要：基于 1992、1997、2007、2017 年 4 个时期的 Landsat TM/ETM+遥感影像，通过监督分类和非监督分类提取冰川边界，分析了冰川面积、体积变化情况以及变化速率。考虑到冰川变化滞后于气候变化，以 12 a 滞后期为标准，选取 1980—2005 年托木尔峰自然保护区的气象数据来分别对应 1992—2017 年的冰川变化情况。研究发现：（1） 1992 年，冰川面积为 1 600.56 km^2，冰川储量为 846.89 km^3；1997 年冰川面积为 1 404.21 km^2，冰川储量为 709.73 km^3；2007 年冰川面积为 1 465.55 km^2，冰川储量为 751.90 km^3；2017 年冰川面积为 1 534.46 km^2，冰川储量为 800.02 km^3。（2） 近 26 a 来，冰川面积总体呈下降趋势，面积共减少 66.10 km^2，占 1992 年冰川面积的 4.13%，年均退缩率为 2.64 $km^2·a^{-1}$。（3） 1992—2017 年冰川储量总体呈减少趋势，共减少 137.16 km^3，减少了 16.20%，年均减少速率为 27.43 $km^3·a^{-1}$。（4） 托木尔峰自然保护区呈暖湿化趋势，年平均气温值为 5.83 ℃，其线性变化率为 0.31 ℃·（10a）$^{-1}$；年降水量平均值为 222.53 mm，其线性变化率为 24.84 mm·（10a）$^{-1}$，二者均通过显著性水平 0.05 检验。总的来说，降水对保护区冰川的影响不足以弥补气温对冰川的消融，这与 1980—1985 年降水量的大幅减少导致冰川面积缩小有很大的关系。

关键词：冰川；冰川储量；年变化率；气候变化；托木尔峰国家级自然保护区

冰川是气候系统的产物，是冰冻圈的重要组成部分[1]，在诸多环境系统中，受气候变化影响最为直接，对全球变暖指示性最为敏感，被认为是气候系统多圈层相互作用的关键纽带[2]。冰川变化情况与河流径流量、气候、降水、土壤蓄水量以及人类生活生产活动等密切相关。尤其是在干旱、半干旱地区，冰川变化对人们的生产、生活、生态以及经济的发展都产生了非常重要的影响[3]。

20 世纪中叶以来，全球变暖加剧，中国冰川普遍发生了退缩，80 年代以后出现了加速消融的趋势[4]，关于冰川时空变化的研究在国内外也受到了高度的重视，已经成为当今生态系统可持续发展研究的热门话题。王雅君等[5]研究发现，近 36 a 玛河流域山区冰川面积总体上呈退缩趋势，总体退缩面积为 1 258.18 km^2。赵刚等[6]利用 RS 与 GIS 技术，系统地研究了南天山地区 3 000 余条冰川的面积变化，结果表明：1990—2011 年冰川面积减少了 13.2%，大规模冰川的分解使得小规模冰川的总面积和条数增加。颜东海等[7]以洪水坝河流域为例，利用地形图和 ASTER 遥感影像及数字高程模型，在 GIS 的支持下对 2 期数据进行统计分析，发现近 47 a 来，洪水坝河流域冰川面积减少了 14.04%，长度退缩了 17.28%，储量减少了 2.26%，气温显著升高是洪水坝河流域冰川快速萎缩的主要原因。刘时银等[8]指出近 50 a 来，中国西部 82.2%的冰川处于退缩状态，冰川面积减少了 4.5%，同时也有一些冰川处于前进状态。此外，近数十年中国西部冰川变化表现出明显的区域差异，青藏高原中部和西北部地区的冰川相对稳定,而高原周边山区的冰川物质亏损严重，处于加速退缩状态。陈虹举等[9]认为，中国冰川变化对气候变化的响应方式与程度不同，对夏季平均气温变化表现为正响应，而对

收稿日期：2019-11-07；修订日期：2020-03-26
基金项目：国家自然科学基金项目（41661100，41461107）资助
作者简介：赵景啟（1994-），女，硕士研究生，研究方向为干旱区绿洲环境演变方面的研究.E-mail: 1456512884@qq.com
通讯作者：满苏尔・沙比提. E-mail:mansursa@163.com

年降水量变化主要表现为负响应，冰川分布区年降水量增加带来的冰川积累量增多不足以抵消因温度升高而增加的消融量，升温是中国西部冰川快速退缩的主导性因素。

托木尔峰国家级自然保护区是新疆重要的供水区，亦是我区重要的农牧业生产区，其冰川融水为其河流下游区域重要的水源地之一，为其下游的居民提供生产与生活用水，其生态环境质量的优劣直接关系到数万人的生产与生活安全[10]。因此，笔者借鉴已有的研究方法，以 1992 年、1997 年、2007 年和 2017 年的 Landsat TM/ETM+遥感影像数据为依据，同时结合气温与降水数据，对托木尔峰自然保护区内冰川变化情况进行研究，以期为该区生态、社会和经济的可持续发展提供服务和参考依据。

1 研究区概况

天山托木尔峰国家级自然保护区位于新疆温宿县境内，南天山的科克莎尔山与子午岭相汇的山结处(79°50´ ~ 80°54´E，41°40´ ~ 42°04´N)，西临吉尔吉斯斯坦，南部与阿克苏以北的地山山麓带相邻，北接昭苏盆地的特克斯河，东与木扎尔特河毗邻[11]。自然保护区总面积 3 445.66 km^2，海拔 1 450~7 443 m，垂直高差近 6 000 m，共发育了从暖温带到雪冰带 7 个垂直自然带谱，形成天山南坡最完整的垂直带谱，为我国少见的高山自然保护区之一[12]，其中雪冰带常年冰雪，并有部分季节性积雪。保护区地处西北地区，气候干燥，昼夜温差大，年内降雨分配不均匀。近年来，全球气候变暖，我国西北地区气候状况也发生了变化，气候朝着暖湿型转变[13-14]，气候条件的改变对冰川发育状况产生了极大的影响。自然保护区作为天山最大的冰川作用中心及众多内陆河水系的发源地，是新疆重要的水资源补给区，生态地位十分重要，是新疆重要的生态屏障，其生态环境的优劣直接关系到新疆数万人的生态安全[15-16]。

2.数据来源与研究方法

2.1 数据来源

采用 1992 年、1997 年、2007 年和 2017 年同一时期（8—9 月）的 Landsat TM/ETM+遥感影像（分辨率 30 m）作为其主要数据来源。遥感解译时选取无云或少云（云量低于 10%）的影像，结合地形图、实地考察资料等资料，在 ArcGIS 等软件下，对遥感影像进行分类解译，得到 4 期托木尔峰国家级自然保护区冰川分布情况。解译时，先将 4 期遥感影像数据进行辐射校正，并对所有影像以大比例尺地形图为参考进行几何纠正，采用统一的投影系统，同时采用数字高程模型对影像进行正射纠正，以减小山区云量的影响[17]。然后，对上述纠正过的影像中的冰川分布边界进行人工判读，对于表碛较为发育的冰川分布区，采用影像叠加 DEM 进行立体显示，结合冰川学知识，提高冰川边界的识别精度[8]。解译结果如图 1 所示。

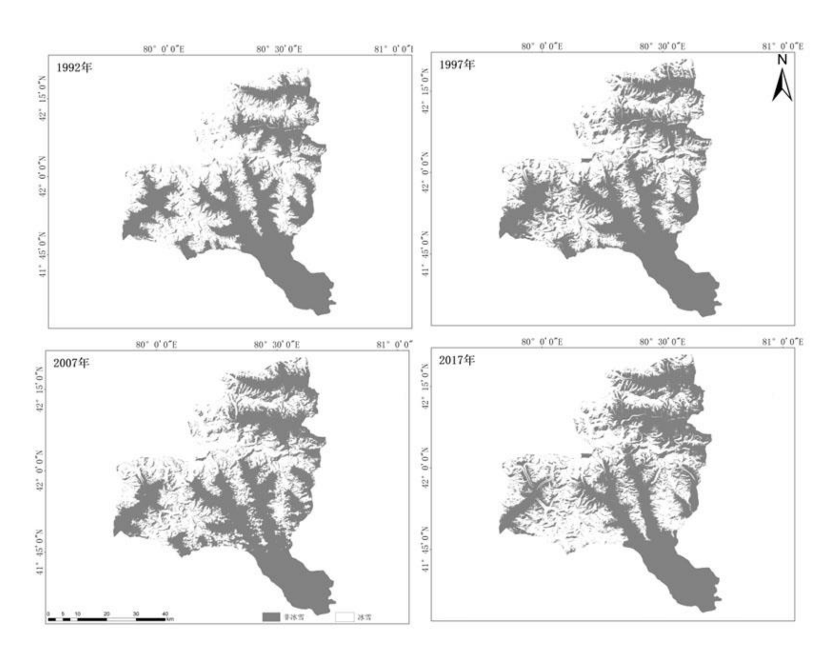


图 1 1992—2017 年冰川变化情况

Fig.1 Glacier changes from 1992 to 2017

结合气温与降水数据分析其与冰川变化情况之间的关系，本文所有气象数据均来源于中国气象数据网（http://data.cma.cn/user/toLogin.html），托木尔峰国家级自然保护区是我国少见的高山自然保护区之一，其海拔高差较大，地貌地形复杂，各海拔之间气候特征以及地理环境之间差异较大，且其保护区内没有长期固定的地面气象站，故笔者选择托木尔峰自然保护区及其周围 6 个气象站点的气象数据，分别代表其高山带、中山带和低山带，并选取这 6 个站点气象数据的算数平均值来代表托木尔峰自然保护区整体状态。同时，考虑到冰川变化滞后于气候变化，以 12 a 滞后期为标准[18-19]，选取 1980—2005 年托木尔峰自然保护区及其周围 6 个气象站点 26 a 的气象数据来对应 1992—2017 年的冰川变化情况，其中气象站点包括靠近保护区北坡的昭苏气象站；保护区南坡西部的吐尔尕特气象站；保护区西南坡的阿合奇气象站；靠近保护区东南坡的拜城气象站；以及保护区周围的温宿气象站和乌什气象站，以此分别代表该保护区高山带、中山带和低山带的降水特征。利用 Origin 软件，采用线性回归法分析托木尔峰国家级自然保护区 26 a 气温与降水趋势倾向，以此获得托木尔峰自然保护区气温与降水量的年际变化趋势曲线和相应的趋势分析方程，利用该方程分析其年际气候变化特征及其与冰川变化之间的关系。所有数据经极值检验、时间一致性检验以及人工抽查均无误。

2.2 研究方法

2.2.1 冰川覆盖率

冰川覆盖率表示研究区相对冰川面积，是冰川面积占研究区总面积的百分比[20]。其计算公式为：

$$P = \frac{Sa}{S} \times 100\% \quad (1)$$

式中：P 为冰川覆盖率；Sa 为研究区冰川面积；S 为研究区总面积。

2.2.2 年均变化率

年均变化率可以用来表征年均变化快慢程度[21]，其计算公式为：

$$v = \frac{S_1 - S_0}{S_0 \bullet T} \times 100\% \quad (2)$$

式中：S_0代表初期冰川面积；S_1代表末期冰川面积；T代表时间间隔。

2.2.3 冰川储量

冰川储量的估算多采用体积—面积经验公式[22]：

$$V = c \bullet S^r \quad (3)$$

式中：V为冰川储量（km^3）；S为冰川面积（km^2）；c与γ为经验系数。现采用 Liu 等[23]提出的经验系数：

$$V = 0.04S^{1.35} \quad (4)$$

3 结果与分析

3.1 冰川面积及分布率分析

通过对 1992—2017 年冰川分布情况图进行解译分析，计算得出各年份冰川面积、非冰川面积以及冰川分布率和非冰川分布率（表 1）。

表 1 1992—2017 年托木尔峰自然保护区冰川与非冰川分布情况

Tab. 1 Distribution of glaciers and non-glaciers in Tomur nature reserve from 1992 to 2017

分布情况 年份		1992 年	1997 年	2007 年	2017 年
冰川	冰川面积/km^2	1 600.56	1 404.21	1 465.55	1 534.46
	冰川覆盖率/%	46.45	40.75	42.53	44.53
非冰川	非冰川面积/km^2	1 845.11	2 041.45	1 980.11	1 911.20
	非冰川覆盖率/%	53.55	59.25	57.47	55.47

由表 1 可知，1992—1997 年冰川面积减少了 196.35 km^2，减少量约占 1992 年面积的 12.27%，年均减少速率高达 39.27 $km^2 \cdot a^{-1}$；1997—2007 年冰川面积增加了 61.34 km^2，增加了 4.37%，年均增加率为 6.13 $km^2 \cdot a^{-1}$；2007—2017 年冰川面积增加了 68.91 km^2，增加了 4.70%，年均增加率为 6.89 $km^2 \cdot a^{-1}$。1992—2017 年冰川总体呈减小趋势，面积共减少 66.10 km^2，占 1992 年冰川面积的 4.13%，年均退缩率为 2.64 $km^2 \cdot a^{-1}$。

3.2 冰川储量分析

由公式（2）计算可得冰川储量（表 2）。由表 2 可知，1992—1997 年冰川储量减少了 137.16 km^3，减少了 16.20%，年均减少速率为 27.43 $km^3 \cdot a^{-1}$；1997—2007 年冰川储量呈缓慢增加趋势，共增加了 42.17 km^3，增加部分占 1997 年的 5.94%，年增长率为 4.22 $km^3 \cdot a^{-1}$；2007—2017 年冰川储量继续增加，共增长 48.12 km^3，增加了 6.40%，年均增长率为 4.81 $km^3 \cdot a^{-1}$；1992—2017 年冰川储量总体呈略微减少的趋势，共减少 46.87 km^3，减少部分占 1992 年的 5.53%，年均减少速率为 1.88 $km^3 \cdot a^{-1}$。

表 2 1992—2017 年托木尔峰自然保护区冰川储量情况

Tab. 2 Glacier reserves in Tomur nature reserve from 1992 to 2017

1992 年冰川储量/km^3	1997 年冰川储量/km^3	2007 年冰川储量/km^3	2017 年冰川储量/km^3
846.89	709.73	751.90	800.02

4 讨论

4.1 托木尔峰国家级自然保护区气候变化

气候变化一直是当前研究的热门话题，全球气温不断升高，降水也受其影响发生改变[24]。秦大河等[25]认为，全球变暖可能造成中纬度地区降水增加，全球变暖将使亚洲季风降水变率加大,很可能加大极端降水发生的频率和幅度。在过去半个多世纪的时间里，我国西北地区表现出明显的暖湿化过程[14]。任朝霞等[26]指出，近 50 a 西北干旱区气候变暖，降水量呈增加趋势,其中新疆南部降水量增加趋势最大，蒸发量增加趋势也较大。姚俊强等[27]研究发现，近 50 a 来西北干旱区气候呈现出暖湿化的趋势，但暖湿化的幅度因季节和地域而存在差异。西北干旱区气温上升速率高达 0.368 ℃·（10 a）$^{-1}$，高于中国和全球变暖趋势，为中国平均升温速率的 1.31 倍和全球平均升温速率的 2.62 倍。其中，冬季增暖趋势最为明显[0.506 ℃·（10a）$^{-1}$]，冬季的显著升温导致了年平均气温的显著变暖。托木尔峰国家级自然保护区地处西北地区，其暖湿化趋势非常明显，满苏尔·沙比提等[28]学者指出，近 55 a 来托木尔峰国家级自然保护区气温升高了 1.5 ℃，变暖主要在秋冬季；降水年增率为 1.27 mm，增湿主要集中在夏秋季。

考虑到冰川变化滞后于气候变化，以 12 a 滞后期为标准，选取 1980—2005 年托木尔峰自然保护区的气象数据来分别对应 1992—2017 年的冰川分布情况，各气象站点气象数据如表 3 所示。对其进行分析发现：

1980—2005 年托木尔峰自然保护区年平均气温总体呈上升趋势（图 2），年气温平均值为 5.83 ℃，其中，最大年平均温度为 6.56 ℃，出现于 1999 年，最小年平均温度为 4.95 ℃，出现于 1984 年，二者相差 1.61 ℃。其线性变化率为 0.31 ℃·（10a）$^{-1}$，并通过显著性水平 0.05 检验。其中 1980—1985 年平均温度为 5.57 ℃，1985—1995 年平均温度为 5.61 ℃，1995—2005 年平均温度为 6.11 ℃，保护区增温趋势明显。

1980—2005 年托木尔峰自然保护区年平均降水量亦呈上升趋势（图 3），年降水量平均值为 220.53 mm，最大年降水量为 302.90 mm，出现于 1998 年；最小年降水量为 141.27 mm，出现于 1985 年，二者相差 161.13 mm。其线性变化率为 24.84 mm·（10a）$^{-1}$，并通过显著性水平 0.05 检验。其中 1980—1985 年平均降水量为 191.3 mm，1985—1995 年平均降水量为 206.09 mm，1995—2005 年平均降水量为 240.04 mm，保护区增湿现象明显。可见，托木尔峰国家级自然保护区暖湿化现象明显，这与姚俊强-等[27-28]学者的结论相一致。

表 3 托木尔峰国家级自然保护区各站点气象数据表

Tab. 3 Meteorological data of all stations in the National Nature Reserve of Mount Tomur

年份 / 气象数据 / 站点		乌什	吐尔尕特	阿合奇	拜城	温宿	昭苏	平均值
1980—1985 年	平均气温/℃	9.20	-3.33	6.31	7.76	10.24	3.24	5.57
	气温线性变化率/（℃·a^{-1}）	-0.16	0.01	-0.08	-0.25	-0.18	-0.20	-0.15
	平均降水量/mm	87.85	208.55	198.43	108.78	58.47	493.38	191.35
	降水线性变化率/	-10.95	-16.93	-26.55	-7.37	-8.64	-28.21	-17.50

	（mm·a-1）							
1985—1995年	平均气温/℃	8.95	-3.29	6.42	7.92	10.34	3.31	5.61
	气温线性变化率/（℃·a-1）	-0.08	-0.03	-0.03	0.002	-0.003	0.03	-0.02
	平均降水量/mm	122.43	262.64	201.35	127.87	70.46	466.60	206.09
	降水线性变化率/（mm·a-1）	5.50	2.59	7.36	1.38	7.01	0.35	3.47
1995—2005年	平均气温/℃	9.13	-2.77	6.98	8.38	11.06	3.89	6.11
	气温线性变化率/（℃·a-1）	0.07	0.03	0.07	0.03	0.08	0.07	0.06
	平均降水量/mm	140.4	273.73	264.75	154.99	103.40	527.81	240.04
	降水线性变化率/（mm·a-1）	1.22	2.51	2.57	2.76	-0.86	11.41	2.67
1980—2005年	平均气温/℃	9.10	-3.08	6.64	8.13	10.64	3.54	5.83
	气温线性变化率/（℃·a-1）	-0.001	0.03	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03
	平均降水量/mm	124.63	259.58	230.71	136.20	81.17	503.08	220.53
	降水线性变化率/（mm·a-1）	2.46	2.53	3.67	2.06	2.37	3.10	2.48

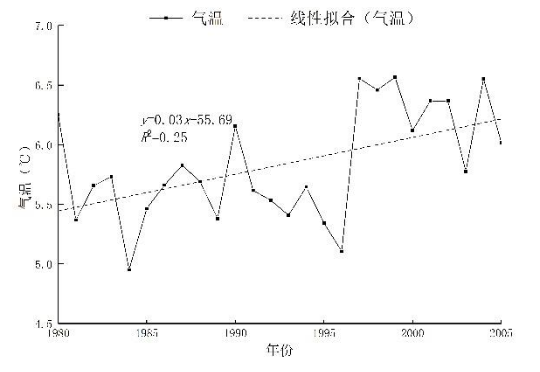


图 2 年气温变化趋势

Fig.2 Trend of annual temperature change

图 3 年降水量变化趋势

Fig.3 Variation trend of annual recipitation change

4.2 冰川对气候变化的响应

影响冰川变化的因素有很多，气温与降水量的变化及其组合关系占主导地位[29-30]。气温会导致冰川的消融，气温与冰川面积之间存在负相关关系，气温的升高，尤其是夏季气温的升高会导致冰川的消融，冰川面积的减少； 降水量是冰川积累的因素，降水量的多少与冰

川面积之间存在正相关关系，降水量增多会增加冰川的积累量，进而扩大冰川面积[31]。二者的不同组合形式决定了冰川的不同性质、发育和演化过程。已有研究发现，气温对大面积冰川的长时间尺度变化有影响，降水量通常只对小面积冰川的短时间尺度变化有影响[32]。

1992—1997 年，托木尔峰国家级自然保护区冰川面积大幅度下降，冰川面积减少了 196.35 km^2，占 1992 年冰川面积的 12.27%，储量减少了 137.16 km^3，占 1992 年冰川储量的 16.20%，这与 1980—1985 年降水量的急剧减少有密不可分的关系。1980—1985 年，保护区气温虽呈下降趋势，但其变化趋势不明显，未通过 0.05 水平的显著检验，其气温变化率为 -1.46 ℃·（10a）$^{-1}$，其气温下降趋势不明显；而就其降水量而言，保护区降水量线性变化率高达-175.00 mm·（10a）$^{-1}$，保护区降水量的急剧减少可能会造成保护区冰川积累量的减少，进而造成保护区冰川面积和储量的快速下降。

1997—2007 年，保护区冰川面积与储量均呈上升趋势。其中，冰川面积增加了 61.34 km^2；冰川储量增加了 42.17 km^3，这是由于保护区气温的下降与降水量的上升双重作用所引起的。该时段（1985—1995 年）内，气温呈略下降趋势，其线性变化率为-0.18 ℃·（10a）$^{-1}$，降水量呈增加趋势，其线性变化率为 34.7 mm·（10a）$^{-1}$，气温与降水均有利于冰川的形成，故此时间段内冰川面积与储量均呈上升趋势。

1997—2007 年，保护区冰川面积仍呈上升趋势，冰川面积增加了 68.91 km^2；冰川储量增加了 48.12 km^3，这主要取决于降水量的增加。该时间段（1995—2005 年）内，降水量总体呈上升趋势，其线性变化率为 26.72 mm·（10a）$^{-1}$，，气温略有增加，但增长幅度很小，可以忽略不计。故 1997—2007 年保护区冰川面积的变化主要与降水量有关。

1992—2017 年，保护区冰川面积整体呈退缩趋势，除 1992—1997 年冰川面积与储量呈减少趋势外，其余年份呈增长趋势。就（1980—2005 年）保护区气象数据来说，气温总体呈上升趋势，且气温在 0.05 水平下呈显著增长趋势，其线性变化率为 0.31 ℃·（10a）$^{-1}$；降水总体亦呈上升趋势，其线性变化率为 24.84 mm·（10a）$^{-1}$。总的来说，降水对保护区冰川的影响不足以弥补气温对冰川的消融，这与 1980—1985 年降水量的大幅下降导致冰川大幅减少有很大的关系。

5 结论

（1）1992 年冰川面积为 1 600.56 km^2，冰川储量为 846.89 km^3；1997 年冰川面积为 1 404.21 km^2，冰川储量为 709.73 km^3；2007 年冰川面积为 1 465.55 km^2，冰川储量为 751.90 km^3；2017 年冰川面积为 1 534.46 km^2，冰川储量为 800.02 km^3。

（2）近 26 a 来，冰川面积呈下降趋势，面积共减少 66.10 km^2，占 1992 年冰川面积的 4.13%，年均退缩率为 2.64 km^2· a^{-1}。其中 1992—1997 年冰川面积减少了 196.35 km^2，减少量约占 12.27%，年均减少速率达 39.27 km^2·a^{-1}；1997—2007 年冰川面积增加了 61.34 km^2，增加了 4.37%，年均增加率为 6.13 km^2·a^{-1}；2007—2017 年冰川面积增加了 68.91 km^2，增加了 4.70%，年均增加率为 6.89 km^2·a^{-1}。

（3）1992—1997 年冰川储量共减少了 137.16 km^3，减少了 16.20%，年均减少速率为 27.43 km^3·a^{-1}；1997—2007 年冰川储量呈增加趋势，共增加了 42.17 km^3，增加部分占 1997 年的 5.94%，年增长率为 4.22 km^3·a^{-1}；2007—2017 年冰川储量继续增加，共增长 48.12 km^3，增加了 6.40%，年均增长率为 4.81 km^3·a^{-1}；1992—2017 年冰川储量总体呈略微减少的趋势，共减少 46.87 km^3，减少部分占 1992 年的 5.53%，年均减少速率为 1.88 km^3·a^{-1}。

（4）托木尔峰自然保护区呈暖湿化趋势，多年年气温平均值为 5.83 ℃，其线性变化率为 0.31 ℃·（10a）$^{-1}$；多年年降水量平均值为 222.53 mm，其线性变化率为 24.84 mm·（10a）$^{-1}$，二者均通过显著性水平 0.05 检验。总的来说，降水对保护区冰川的影响不足以弥补气温对冰川的消融，这与 1980—1985 年降水量的大幅下降导致冰川大幅减少有很大的关系。

参考文献（References）：

[1] 李珊珊,张明军,李忠勤,等.1960—2009 年中国天山现代冰川末端变化特征[J].干旱区研究,2013,30(2):378-384. [Li Shanshan, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Variation of glacier terminuses in the Tianshan Mountains,China,during the period of 1960-2009 [J]. Arid Zone Research,2013,30(2):378-384.]

[2] 李虹蓉,杨太保,田洪阵,等.1987—2015 年祁连山冰川退缩及未来变化趋势研究[J].安徽农业科学,2017,45(30):59-63. [Li Hongrong, Yang Taibao,Tian Hongzhen,et al.Study on glacier retreat and future changes trends in the Qilian Mountains during 1987－2015[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2017,45(30):59-63.]

[3]黄晓然,包安明,郭浩,等.近 20 a 中国天山东段典型冰川变化及其气候响应[J].干旱区研究,2017,34(4):870-880. [Huang Xiaoran, Bao Anming, Guo Hao, et al. Change of typical glaciers and its response to meteorological factors in the Eastern Tianshan Mountains in China in recent 20 years [J]. Arid Zone Research,2017,34(4):870-880.]

[4]姚檀栋,刘时银,蒲健辰,等.高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J].中国科学(D 辑:地球科学),2004,34(6):535-543. [Yao Tandong, Liu Shiyin, Pu Jianchen, et al. Recent retreat of the high Asia glacier and its impact on water resources in Northwest China [J]. Science in China Ser. D Earth Sciences),2004,34(6):535-543.]

[5]王雅君,徐丽萍,郭鹏,等.1977-2013 年玛河流域山区冰雪覆被消融态势分析[J].水土保持研究,2015,22(6):208-212,218.[Wang Yajun, Xu Liping, Guo Peng, elt al. Analysis on melting snow and ice cover in Manas River basin during the period from 1977 to 2013 [J]. Research of Soil and Water Conservation Research,2015,22(6):208-212,218.]

[6]赵刚,杨太保,田洪阵.1990—2011 年南天山地区冰川面积变化对气候的响应[J].水土保持研究,2014,21(2):257-263,268. [Zhao Gang, Yang Taibao, Tian Hongfang. Response of glacier area variation to climate change in Southern Tianshan Mountains during 1990-2011 [J]. Research of Soil and Water Conservation Research,2014,21(2):257-263,268.]

[7]颜东海,申亚鹏,赵秀杰,等.基于遥感和 GIS 的洪水坝河流域冰川变化研究[J].测绘与空间地理信息,2014,37(8):26-29. [Yan Donghai, Shen Yapeng, Zhao Xiujie, et al. Glacier variation in the Hongshuibahe River basin based on remote sensing data and GIS technique [J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2014,37(8):26-29.]

[8]刘时银,丁永建,李晶,等.中国西部冰川对近期气候变暖的响应[J].第四纪研究,2006,26(5):762-771. [Liu Shiyin, Ding Yongjian, Li Jing, elt al. Glaciers in response to recent climate warming in Western China [J]. Quaternary Sciences,2006,26(5):762-771.]

[9]陈虹举,杨建平,谭春萍.中国冰川变化对气候变化的响应程度研究[J].冰川冻土,2017,39(1):16-23. [Chen Hongju, Yang Jianping, Tan Chunping.Responsivity of glacier to climate change in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(1):16-23.]

[10]满苏尔·沙比提,娜斯曼·那斯尔丁,艾萨迪拉·玉苏甫.天山托木尔峰国家级自然保护区生态系统服务价值评估[J].山地学报,2016,34(5):599-605. [Mansur Sabit, Nasima Nasirdin, Asaddulla Yusup. Evaluation on ecosystem service value of Tianshan Tomur national nature reserve [J]. Mountain Research,2016,34(5):599-605.]

[11]满苏尔·沙比提,马国飞,张雪琪.托木尔峰国家级自然保护区土地利用/覆被变化及驱动力分析[J].冰川冻土,2017,39(6):1241-1248. [Mansur Sabit, Ma Guofei, Zhang Xueqi. Analysis of land use/cover change and its driving force in Tomur national nature reserve [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(6):1241-1248.]

[12]马国飞,满苏尔·沙比提,张雪琪.托木尔峰自然保护区台兰河上游不同海拔灌木土壤理化性质研究[J].土壤通报,2017,48(6):1288-1295. [Ma Guofei, Mansur Sabit, Zhang Xueqi. Physicochemical properties of surface soil under different shrubs at various altitudes in upstream of Tailan River in Mount Tuomuer [J]. Chinese Journal of Soil Science,2017,48(6):1288-1295.]

[13]胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等.新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响[J].干旱区地理,2002,25(3):194-200. [Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun, et al. A study onsignals and effects of climatic pattern change from warm-dry to warm-wet in Xinjiang [J]. Arid Land Geography,2002,25(3):194-200.]

[14]施雅风,沈永平,李栋梁,等.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究,2003,23(2):152-164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences,2003,23(2):152-164.]

[15]马国飞,满苏尔·沙比提,张雪琪.托木尔峰国家级自然保护区台兰河上游不同海拔草地土壤持水能力研究[J].草地学报,2017,25(5):966-972. [Ma Guofei, Mansur Sabit, Zhang Xueqi. Research on water holding capacity of grassland soil at different altitudes in the Tuomuer national nature reserve [J]. Acta Agrestia Sinica,2017,25(5):966-972.]

[16]赵景啟,满苏尔·沙比提,麦丽开·艾麦提,等.1967—2018 年托木尔峰国家级自然保护区降水时空变化特征[J].干旱区研究,2019,36(6):1487-1493. [Zhao Jingqi,Mansur Sabit,Mailikai Aimaiti,et al. Spatiotemporal variation of precipitation in Tomur peak nature reserve from 1967 to 2018[J]. Arid Zone Reseach,2019,36(6):1487-1493.]

[17]刘金巍,靳甜甜,刘国华,等.新疆玛纳斯河流域 2000—2010 年土地利用/覆被变化及影响因素[J].生态学报,2014,34(12):3211-3223. [Liu Jinwei, Jin Tiantian, Liu Guohua,et al. Analysis of land use/cover change from 2000 to 2010 and its driving forces in Manas River basin,Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(12):3211-3223.]

[18]王宁练,张祥松.近百年来山地冰川波动与气候变化[J].冰川冻土,1992,14(3):242-250. [Wang Ninglian, Zhang Xiangsong. Mountain glacier fluctuations and climate change during the last 100 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,1992,14(3):242-250.]

[19]许艾文,杨太保,王聪强,等.1978-2015 年喀喇昆仑山克勒青河流域冰川变化的遥感监测[J].地理科学进展,2016,35(7):878-888. [Xu Aiwen, Yang Taibao, Wang Congqiang, et al. Variation of glaciers in the Shaksgam River basin,Karakoram Mountains during 1978-2015 [J].Progress in Geography,2016,35(7):878-888.]

[20]秦艳,丁建丽,赵求东,等.2001-2015 年天山山区积雪时空变化及其与温度和降水的关系[J].冰川冻土,2018,40(2):249-260. [Qin Yan, Ding Jianli, Zhao Qiudong, et al. Spatial-temporal variation of snow cover in the Tianshan Mountains from 2001 to 2015，and its relation to temperature and precipitation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2018,40(2):249-260.]

[21]崔志勇,李志伟,李佳,等.1970—2000 年青藏高原内流区冰川储量变化的初探[J].地球物理学报,2014,57(5):1440-1450. [Cui Zhiyong, Li Zhiwei, Li Jia,et al. A preliminary study of the volume variation of the glaciers in the Qinghai-Tibetan plateau interior area between 1970 and 2000[J]. Chinese Journal of Geophysics,2014,57(5):1440-1450.]

[22]孙美平,刘时银,姚晓军,等.近 50 年来祁连山冰川变化——基于中国第一、二次冰川编目数据[J].地理学报,2015,70(9):1402-1414. [Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century:Based on the revised first and second Chinese glacier inventory [J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(9):1402-1414.]

[23] Liu S, Sun W, Shen Y, et al. Glacier changes since the little ice age maximum in the western Qilian Shan, Northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply. Journal of Glaciology, 2003, 49(164): 117-124.

[24]Frank W J, Lucrezia R, Kyle H, et al. How much more rain will global warming bring?[J]. Science,

2007,317(5835)233-235.
[25]秦大河,Thomas Stocker,259 名作者和 TSU.IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J].气候变化研究进展,2014,10(1):1-6. [Qin Dahe,Thomas Stocker，259 Authors and TSU. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. Progressus Inquisttiones De Mutatione Climatis,2014,10(1):1-6.]

[26]任朝霞,杨达源.近 50 a 西北干旱区气候变化趋势及对荒漠化的影响[J].干旱区资源与环境,2008,22(4):91-95. [Ren Chaoxia, Yang Dayuan.Climate change and surface runoff change impact on desertification in the arid area of Northwest China in resent 50 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008,22(4):91-95.]
[27]姚俊强,杨青,陈亚宁,等.西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J].生态学杂志,2013,32(5):1283-1291. [Yao Junqiang, Yang Qing, Chen Yaning, et al. Climate change in arid areas of Northwest China in past 50 years and its effects on the local ecological environment[J]. Chinese Journal of Ecology,2013,32(5):1283-1291.]
[28]满苏尔·沙比提,张雪琪,马国飞.近 55 a 托木尔峰国家级自然保护区气候及径流变化特征[J].山地学报,2017,35(6):769-777. [Mansur Sabit, Zhang Xueqi, Ma Guofei. Climatic and runoff characteristics of Tomur national nature reserve for recent 55 years [J]. Mountain Research,2017,35(6):769-777.]
[29]李龙,姚晓军,刘时银,等.近 50 年丝绸之路经济带中国境内冰川变化[J].自然资源学报,2019,34(7):1506-1520. [Li Long, Yao Xiaojun, Liu Shiyin, et al. Glacier changes along the Silk Road Economic Belt in China in the past 50 years:Based on the revised first and second Chinese glacier inventory [J]. Journal of Natural Resources,2019,34(7):1506-1520.]
[30]段建平,王丽丽,任贾文,等.近百年来中国冰川变化及其对气候变化的敏感性研究进展[J].地理科学进展,2009,28(2):231-237. [Duan Jianping, Wang Lili, Ren Jiawen, et al. Progress in glacier variations in China and its sensitivity to climatic change during the past century [J]. Progress in Geography,2009,28(2):231-237.]
[31]周祖昊,韩宁,蔡静雅,等.祁连山区冰川演变特征及对气候变化的响应——以苏干湖流域为例[J].冰川冻土,2017,39(6):1172-1179. [Zhou Zuhao, Han Ning, Cai Jingya, et al. Variation characteristics of glaciers and their response to climate change in the Qilian Mountains:Take the Suganhu basin as an example [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(6):1172-1179.]
[32]高晓清,汤懋苍,冯松.冰川变化与气候变化关系的若干探讨[J].高原气象,2000,19(1):9-16. [Gao Xiaoqing, Tang Maocang,Feng Song. Discussion on the relationship between glacial fluctuation and climate change [J]. Plateau Meteorology,2000,19(1):9-16.]

Change of glacier in Tuomuer peak national nature reserve from 1992 to 2017

ZHAO Jing-qi[1]，Mansur Sa-bit[1]，Mailikai Ai-maiti[1]，Nijiate Yimier[1]
(College of geographic science and tourism, Xinjiang normal university, Urumqi 830054,*Xinjiang,China)*

Abstract: Based on Landsat TM/ETM+ remote sensing images from 1992, 1997, 2007 and 2017, the glacier boundary was extracted by supervised classification and unsupervised classification, and the changes of glacier cover area, volume and change rate were analyzed. Considering that the glacial change lags behind the climate change, taking the 12-year lag period as the standard, the author selects the meteorological data of the Tuomuer

peak nature reserve from 1980 to 2005 to respectively correspond to the glacial change from 1992 to 2017. Research findings: （1）In 1992, the glacier cover area was 1 600.56 km^2 and the glacier reserve was 846.89 km^3. In 1997, the glacier cover area was 1 404.21 km^2 and the glacier reserve was 709.73 km^3. In 2007, the glacier cover area was 1 465.55 km^2 and the glacier reserve was 751.90 km^3. In 2017, the glacier cover area was 1 534.46 km^2, and the glacier reserve was 800.02 km^3. （2） In the past 26 years, the total area of glaciers has declined 66.10 km^2, accounting for 4.13% of the total area of glaciers in 1992, with an average annual retreat rate of 2.64 km^2·a^{-1}. （3） From 1992 to 2017, the glacier reserves showed a trend of slight decrease, with a total decrease of 137.16km^3, accounting for 16.20% of 1992, with an average annual decrease rate of 27.43 km^3•a^{-1}.（4）The Tuomuer peak nature reserve shows a warming and wetting trend. The average annual temperature is 5.83 ℃, and the linear change rate is 0.31 ℃• (10a) $^{-1}$. The average annual precipitation was 222.5 mm, and its linear change rate was 24.84 mm• (10a) $^{-1}$, both of which passed the significance level 0.05 test. In general, the impact of precipitation on glaciers in the reserve is not enough to compensate for the melting of glaciers caused by temperature, which is closely related to the significant reduction of glaciers caused by the sharp drop of precipitation between 1980 and 1985.

Key words: ice cover; snow and ice reserves; the rate of change; climate change；Tomur peak national nature reserve